doi:10.13866/j.azr.2019.04.10

沙地植物幼苗生长对降水和风速变化的响应①

孙姗姗[1,2]， 刘新平[1,3]， 魏水莲[4]， 张铜会[1,3]， 何玉惠[1,3]，
车力木格[1,2]， 吕 朋[1,2,3]， 王明明[1,2]

（1. 中国科学院西北生态环境资源研究院奈曼沙漠化研究站，甘肃 兰州 730000；2. 中国科学院大学，北京 100101；
3. 中国科学院西北生态环境资源研究院乌拉特荒漠草原研究站，甘肃 兰州 730000；
4. 北京中天润成环保科技有限公司，北京 100000）

摘 要：为研究沙地植物幼苗生长对降水和风速变化的响应过程，于2016年4月中旬利用40个2 m×2 m×2 m的混凝土样方池，通过人工增雨及遮风网降低风速的方法开展模拟控制实验。结果表明：① 风速、降水以及两者的协同作用对萌发物种数无显著影响($P>0.05$)。风速降低20%和降水增加60%使种子萌发物种数与对照相比分别增加4.9%和1.3%；风速降低20%条件下，自然降水和降水增加60%均可使种子萌发物种数增加7.2%。② 不同降水处理会使植物幼苗密度大幅度降低、高度波动变化；风速降低可以较显著地促进沙地植物幼苗生长高度，特别是优势植物猪毛菜(*Salsola collina*)、大果虫实(*Corispermum macrocarpum*)的生长高度($P<0.01$)。在自然风速条件下，降水增加30%明显促进猪毛菜幼苗高度生长，降水增加60%则相反；风速降低20%条件下，降水增加60%可以大幅度的促进雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)幼苗的生长高度；风速降低40%与降水增加30%和60%的协同作用使雾冰藜、猪毛菜和大果虫实幼苗的生长高度均明显降低。③ 不同风速和降水处理对植被的Simpson优势度指数(D)、香浓－威纳多样性指数(H)、Pielou均匀度指数(J)无显著影响($P>0.05$)。以上研究结果表明：降水增加30%对种子萌发阶段物种丰富度的抑制作用较大；与降水相比，风速是沙地植物幼苗生长高度的主要影响因素，并且自然降水条件下，风速降低40%可以使沙地植物幼苗生长高度最大限度地增加；沙地植被物种多样性指数对降水及风速的变化不敏感，这说明科尔沁沙地生态系统群落结构相对较为稳定。

关键词：沙地植物；降水；风速；幼苗生长；科尔沁沙地

在干旱与半干旱地区，水是限制植物定居、生存和生长的关键因子[1-2]。降水是干旱、半干旱生态系统重要的水分来源，是不同时空尺度各种生物过程的重要驱动因子[3]，同时也是沙地植物正常生长和退化植被恢复重建的重要限制因子。降雨量对沙地植物生长和生物量有显著影响[4]，可直接影响植被的分布格局[5]，并且降雨量及降水时间分布对沙地植物定殖、生长以及物种结构组成有至关重要的作用[6]。降水减少促进植物成熟，减少干物质积累；降水增加能为植物提供充足的水源，有利于植物营养生长和植被生产力的提高。风是影响植物生长的一个重要的环境因子[7]，而且对植物生长的影响较其他因子复杂。风对植物生长有直接和间接作用[8]，直接作用是指风对植物的机械刺激影响植物的生理活动，间接作用则是指风引起叶环境(湿度、温度、气体浓度等)发生变化而产生的作用。风对植物生长、发育和繁衍的整个过程都有重要影响[9]。随着全球及区域气候变化的日益加剧，气候暖干化趋势明显[10]，而且全球范围内平均风速有下降趋势[11]，特别是在我国北方干旱、半干旱地区。降水格局的改变会影响植物生长、改变种间关系[12-13]，同时降水、风速变化会对这些地区植被资源的稳定和可持续发展利用产生重要的影响[14]。近年来，关于不同生态因子(单因子水平、双因子协同水平)对植物生长特征和生理特性等方面的研究成果较多。在干旱、半干旱区域的沙地生态系统中，种子萌发的时间和地点对于植物的定居和存活具有关键作用。朱选伟等[15]在研究中指出，小叶锦鸡儿

① **收稿日期：**2018－10－24； **修订日期：**2018－11－14
基金项目：国家重点研发计划课题(2017YFC0506706,2016YFC0500907)；国家自然科学基金项目(41801076)；内蒙古自治区科技重大专项课题“内蒙古草原生态大数据平台构建与应用开发研究和内蒙古植物种质资源保护、开发利用及产业化示范”(Y749BJ1001)
作者简介：孙姗姗(1993－)，女，硕士研究生，主要从事生态水文学等方面的研究. E-mail：Ssshan93@163.com
通讯作者：刘新平. E-mail：liuxinping@lzb.ac.cn

以及其他植被的种子萌发、出苗与幼苗生长对不同深度的沙埋、土壤含水量会有不同的响应。孙岩等[16]、张腊梅等[17]分析了降水变化对植物幼苗生长、群落物种多样性和生物量的不同程度的影响。有研究者发现不同风速和吹袭时间间隔会对植物生理生态特征产生显著影响。也有研究涉及温度与降水的协同作用、CO_2 浓度与降水的变化对荒漠区植物生长过程所产生的影响[18-19]。但有关风速与降水的协同作用对沙地植物种子萌发、幼苗生长过程影响的研究相对缺乏。

科尔沁沙地位于我国北方半干旱与半湿润地区过渡带[20],同时也是我国北方农牧交错带风沙危害最为严重的地区之一。近年来,由于人类活动加剧以及气候干旱化导致地下水位下降,因而大气降水是该地区土壤水分最主要的自然补给来源[21]。采用气候模型预测我国北方荒漠化地区暖干化气候可能会在很长一段时期内存在,特别是未来全国年平均风速呈减小趋势,而我国北方地区风速下降最为显著[22],风速以及降水格局的变化势必会影响到沙地植物的生长[23],且沙地植物的变化过程决定着沙漠化的发展与逆转,从而对当地的生态安全与经济发展产生重要影响[24]。因此,开展风速和降水变化对沙地植物生长特征影响的研究,不仅可以增进对半干旱沙地植物生长对风沙环境适应机制的理解,而且可以对沙地植物的选育及引种,沙地植被恢复和稳定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于科尔沁沙地东南部奈曼旗境内(42°41′~45°15′N、118°35′~123°30′E)[25],该地区属温带半干旱大陆性气候,年平均降水量 356.9 mm,且主要集中在 6—8 月,年平均风速 3.4 m·s^{-1},年平均扬沙天气 20~30 d[14],大风天气主要集中在 2—5 月。年平均蒸发量 1 900 mm,年平均气温 6.5 ℃,≥10 ℃年积温 3 190 ℃,无霜期 151 d。科尔沁沙地主要地貌类型包括沙丘、低缓起伏沙地、丘间低地、冲积平原和石质残丘。沙丘又可分为固定沙丘、半固定沙丘和流动沙丘[26]。研究区天然植物群落以中旱生植物为主,流动沙丘优势植物种为沙米(*Agriophyllum squarrosum*)和狗尾草(*Setaria viridis*);半固定沙丘主要为差巴嘎蒿(*Artemisia halodendrom*)和大果虫实(*Corispermum macrocarpum*);固定沙丘优势种有黄蒿(*Artemisia scoparia*)和冷蒿(*Artemisia frigida*)等;沙质草地优势种为糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、芦苇(*Phragmites communis*)和白草(*Pennisetum centrasiaticum*)等[27]。

1.2 研究方法

本研究于 2016 年 4 月中旬在中国科学院西北生态环境资源研究院奈曼沙漠化研究站进行,利用 2 m×2 m×2 m 的 40 个混凝土浇筑样方池开展实验,样方池壁入土深度 1.8 m。样方池中土壤由固定沙地深层土分层填装,不含土壤种子库。生长季开始前人工添加土壤种子库,选取固定沙地 5 cm 的表层土壤装入土袋,用孔径 10 mm 的筛子筛除杂物,然后将土样均匀平铺在 40 个水泥池中,厚度保持为 5 cm。本研究降水变化控制实验为 3 个水平:自然降水(P0)、降水增加 30%(P1)、降水增加 60%(P2)。增雨在每次降雨结束后立即进行(降雨量≥5 mm 为有效降雨),对应样方池内增加所测量降雨量的 30% 和 60%。风速控制实验也为 3 个水平:自然风速(W0)、风速降低 20%(W1)、风速降低 40%(W2)。在样方池周围用长 2 m×宽 2 m×高 1 m 的长方体遮风网围封。经测定,单层孔径 3 mm 的遮风网能降低自然风速 20%,双层遮风网能降低自然风速 40%。实验设计为风速和降水双因素的重复对比实验,每个因素又可分为 3 个水平,即降水(P0、P1 和 P2),风速(W0、W1 和 W2),共 9 个处理,每个处理至少 3 个重复。实验区主要优势种有雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、大果虫实(*Corispermum elongatum*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、大籽蒿(*Artemisia sieversiana*)、尖头叶藜(*Chenopodium acuminatum*)及赖草(*Leymus secalinus*)等。

1.3 实验观测

于种子萌发阶段(5 月 1—31 日),测量实验场地降雨量、风速变化、土壤水分及土壤温度,观测结果如表 1、图 1 所示。测定方法如下:

1.3.1 降雨量 在样地附近放置 3 个标准雨量筒,每次降雨结束后,立即读取降雨量。

1.3.2 土壤水分 采用 TDR 300 土壤水分速测仪测定土壤表层 0~10 cm 的土壤水分,每天 8:00 将 40 个样方池各测 1 次。

1.3.3　风速　采用 DEM6 型轻便风向风速表测定植物冠层的风速，每天 8:00 开始测量，每隔 4 h 测 1 次，每天测 3 次。

1.3.4　土壤温度　每天 8:00 用数字探针温度计测定土壤表层 0 ~ 10 cm 的土壤温度。

1.3.5　植被调查　分别于 5 月初、5 月中、5 月末调查样方内植物种类、多度、高度、盖度。

1.3.6　物种多样性指数　采用广泛应用的 Simpson 优势度指数（D）、香浓—威纳指数（H）和 Pielou 均匀度指数（J）来计算[28]。

表 1　实验区降雨量、风速、土壤水分以及土壤温度

Tab. 1　Precipitation, wind velocity, soil moisture and soil temperature in the experiment area

实验条件	土壤温度/℃	土壤水分/%	风速/（$m \cdot s^{-1}$）
W0 × P0	16.5	7.8	1.3
W0 × P1	16.4	9.0	1.4
W0 × P2	16.2	8.6	1.3
W1 × P0	16.2	7.8	1.0
W1 × P1	16.1	9.1	1.0
W1 × P2	16.0	10.2	1.0
W2 × P0	15.9	7.9	0.8
W2 × P1	15.7	8.2	0.8
W2 × P2	15.5	9.2	0.8

注：P0、P1、P2 分别表示自然降水、降水增加 30%、降水增加 60%；W0、W1、W2 分别表示自然风速、风速降低 20%、风速降低 40%。下同。

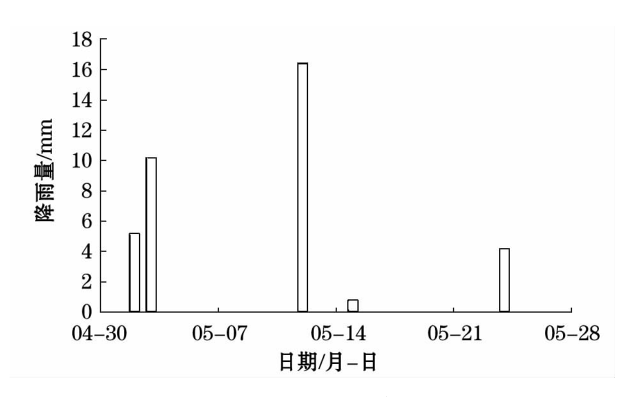


图 1　研究区 5 月降雨量

Fig. 1　Precipitation in May in the study area

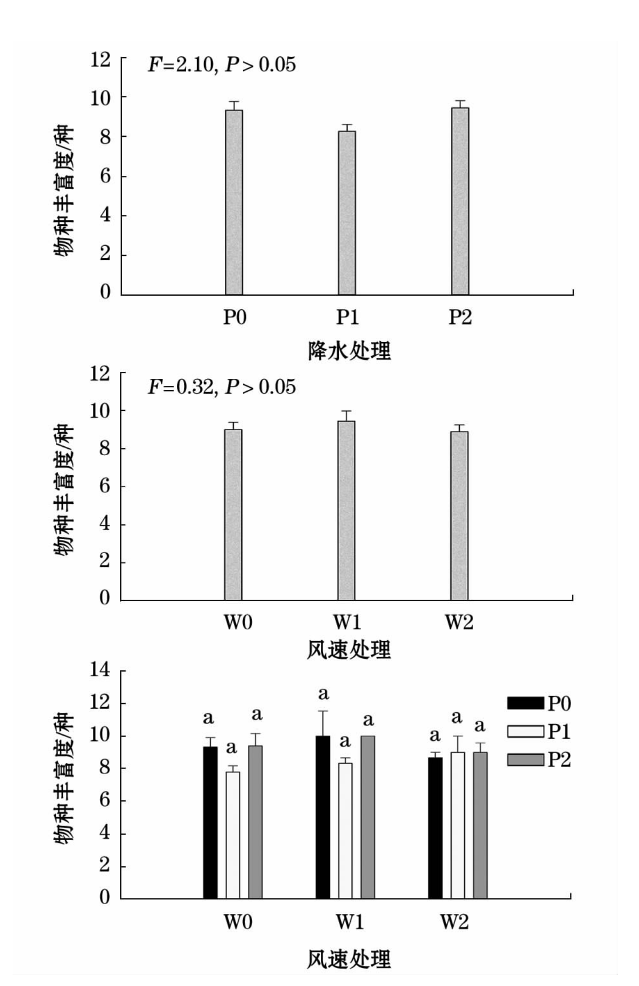
1.4　数据分析

利用 SPSS 19.0 软件对所测数据进行单因素方差分析（one-way ANOVA）、双因素方差分析和差异显著性分析（最小显著性差异法 - LSD），显著水平为 0.05。利用 Excel 2018 和 Sigmaplot 12.5 软件进行图表绘制。

2　结果与分析

2.1　不同降水和风速处理下植物种子萌发的物种数

不同降水、风速处理对沙地植物种子萌发的物种数影响不显著（$P > 0.05$）。如图 2 所示，降水增加 30% 物种丰富度有降低的趋势，该条件下物种丰富度比对照降低 11.4%；风速降低 20% 使种子萌发物种数增加，与对照相比增加 4.9%。在考虑风速和降水条件下，自然风速降水增加 30%；风速降低 20%，降水增加 30% 以及风速降低 40% 自然降水条件下均使物种丰富度降低，与对照相比分别降低 16.4%、10.7% 和 7.1%；风速降低 20% 条件下，自然降水和降水增加 60% 均可使种子萌发的物种数增加，并且与对照相比都增加 7.2%。



注：不同小写字母表示同一水控，不同风控间差异显著（$P < 0.05$）；P0、P1、P2 分别表示自然降水、降水增加 30%、降水增加 60%；W0、W1、W2 分别表示自然风速、风速降低 20%、风速降低 40%。下同。

图 2　降水和风速处理下的物种丰富度

Fig. 2　Species richness under precipitation and wind velocity treatments

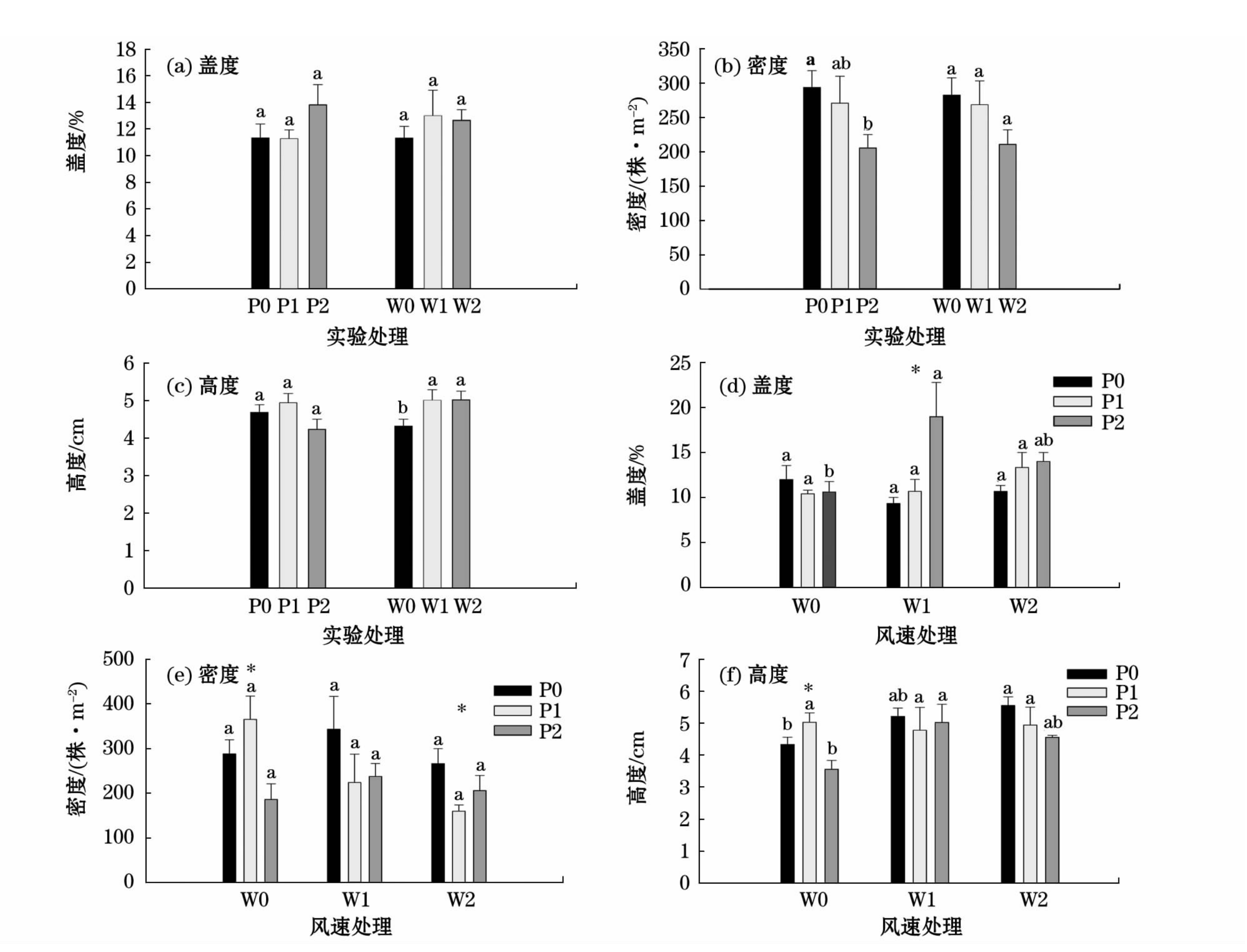
2.2 不同降水和风速处理下植物幼苗特征

降水和风速的增减变化对沙地植物幼苗盖度、密度和高度的影响如图3所示。降水增加60%,风速降低20%、40%均使植物幼苗盖度增加,与对照相比分别增加了18%、14.8%和11.9%;降水增加和风速降低对植物幼苗密度均有抑制作用,并且降水增加60%、风速降低40%抑制作用较其他实验处理更明显,分别降低了19.8%和16.1%;风速降低对植物幼苗高度有较大的促进作用,最高可促进幼苗高度增长16.2%。在降水增加60%条件下,风速降低使得植物幼苗盖度显著增加,并且风速降低20%和风速降低40%使植物幼苗盖度分别增加79%和32%;在自然风速条件下,降水处理对植物幼苗密度和高度有显著影响($P<0.05$),降水增加30%使植物幼苗密度和高度分别增加26.8%、15.9%,然而降水增加60%则刚好相反,使植物幼苗密度和高度分别减少35.5%、17.8%。

植被调查数据显示,不同风速和降水处理下的3种优势植物为雾冰藜、猪毛菜、大果虫实。进一步分析降水增加和风速降低对3种优势植物的高度可知,与降水处理相比,风速处理更能明显影响优势植物高度。由图4可知,风速降低可以较大幅度增加猪毛菜幼苗的高度,极显著增加大果虫实幼苗的生长高度($P<0.01$),最高可分别增加19.9%和31.2%。在自然风速条件下,不同降水处理使优势植物猪毛菜幼苗高度变化较为显著,降水增加30%明显促进猪毛菜幼苗高度生长,降水增加60%则刚好相反;风速降低20%条件下,降水增加60%可以大幅度促进雾冰藜幼苗的生长高度;风速降低40%条件下,降水增加则使雾冰藜幼苗、猪毛菜幼苗、大果虫实幼苗的生长高度均明显降低。

2.3 不同降水和风速处理下植物种子萌发阶段物种多样性

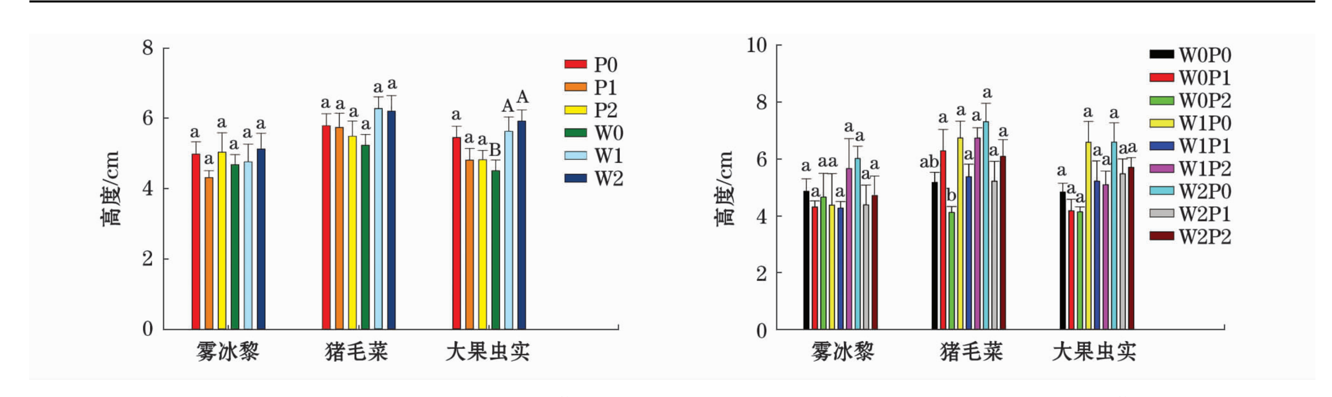
降水和风速处理对植物种子萌发阶段物种多样



注:图a~c中不同小写字母表示不同风控、不同水控间差异显著($P<0.05$);图d~e中不同小写字母表示同一水控,不同风控间差异显著($P<0.05$);*表示同一风控,不同水控间差异显著($P<0.05$)。

图3 降水和风速处理下的植被变化

Fig. 3 Vegetation change under precipitation and wind velocity treatments



注:不同小写字母表示同一物种不同处理间差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示同一物种不同处理间差异显著($P<0.01$)。

图 4 降水和风速处理下的优势植物高度

Fig. 4 Heights of dominant plants under precipitation and wind velocity treatments

表 2 降水和风速处理对物种多样性指数的影响

Tab. 2 Effect of precipitation and wind velocity on species diversity

实验处理	Simpson 优势度指数	香浓-威纳多样性指数	Pielou 均匀度指数
P0	0.84±0.01a	1.90±0.04a	0.86±0.02a
P1	0.82±0.01a	1.87±0.05a	0.89±0.01a
P2	0.84±0.01a	1.99±0.03a	0.89±0.01a
W0	0.83±0.03a	1.89±0.04a	0.87±0.02a
W1	0.83±0.01a	1.94±0.05a	0.87±0.01a
W2	0.84±0.01a	1.96±0.04a	0.90±0.01a
W0×P0	0.84±0.01a	1.88±0.06a	0.85±0.03a
W0×P1	0.80±0.02a	1.81±0.08a	0.88±0.03a
W0×P2	0.84±0.01a	2.00±0.05a	0.90±0.01a
W1×P0	0.83±0.02a	1.96±0.12a	0.86±0.02a
W1×P1	0.81±0.02a	1.84±0.07a	0.87±0.02a
W1×P2	0.84±0.02a	2.01±0.07a	0.87±0.03a
W2×P0	0.83±0.01a	1.93±0.05a	0.90±0.01a
W2×P1	0.85±0.01a	2.00±0.07a	0.92±0.02a
W2×P2	0.83±0.01a	1.94±0.08a	0.89±0.01a

注:同列不同小写字母表示不同处理之间差异显著。

性影响如表 2 所示,不同降水和风速处理条件对物种 Simpson 优势度指数、香浓-威纳多样性指数以及 Pielou 均匀度指数均无显著影响($P>0.05$)。其中,降水增加 60% 和风速降低 40% 均可使香浓-威纳多样性指数较大幅度增加;在自然风速和风速降低 20% 条件下,降水增加 60% 也可以使物种香浓-威纳多样性指数有明显增加的趋势。

3 讨 论

在干旱、半干旱地区,沙地植物生长的环境胁迫因子主要包括沙丘移动、水分和土壤养分等[1]。沙地植物对于干旱、半干旱地区的沙地生态系统的环境胁迫具有特定的适应方式[29-30]。在沙地环境条件下,水分尤其是土壤水分是植物种子萌发和生长的主要制约因子[31]。在植物的生活史中,种子对外界极端环境的抵抗力最强,而幼苗最弱。降水格局和降雨量是决定植物生殖、生长至关重要的因素[6,32],降水的变化对沙地植物群落结构、生物多样性特征和生产力等过程都有着不同程度的影响,甚至决定着整个生态系统的结构和功能[33]。干旱半干旱区域降水稀少,土壤水分蒸发量大,太阳辐射强,全年多风,并且风速较大,风速的大小可以影响土壤温度及含氧量,风速降低可以明显降低土壤水分蒸发量[34],进而影响种子萌发[35]。

在科尔沁沙地,降水常常开始于每年的 5 月,并且 5 月 1—31 日是当地植物种子萌发和幼苗生长阶段,单因子风速处理、风速降低 20% 和自然降水的交互作用,风速降低 20% 和降水增加 60% 的交互作用均可使沙地植物种子萌发物种数增加。研究区 5 月降水较少,植物的生长会一定程度受到抑制,降水量的增加对沙地植被幼苗生长高度的影响不显著($P>0.05$)。降水增加 60%、风速降低处理,使沙地植物幼苗盖度显著增加。然而,降水增加、风速降低处理使沙地植物幼苗密度降低。有两种可能:一是风速与降水的协同作用,使沙地植物幼苗密度大幅度波动,风速或降水单因子对沙地植物幼苗密度的作用不显著,甚至仅会使其降低;二是降水增加或风速降低,抑制了该实验区某些物种种子的萌发,最明显的是狗尾草优势物种的地位被掩盖,进而导致所在样地的平均密度降低。降水增加 60%、风速降低 40% 处理对植被密度抑制作用更加明显。降水增加一定比例会使萌发物种数、幼苗平均高度、植被盖度

增加,但会使幼苗密度降低,这一结论与李淑君等[36]的研究结果一致。王增如等[37]的研究也表明,不同的水分处理不仅会影响植物种子萌发的物种数,也会影响植物幼苗密度。风速降低处理对植物幼苗高度有显著促进作用,最高可促进幼苗高度增长16.2%,该结果与王林等[38]的研究结果一致:实验结束时风吹植株株高仅为对照的68%,即风吹条件使植株株高降低。本研究进一步指出,单因素处理风速降低可以较大幅度增加猪毛菜的高度,显著增加大果虫实幼苗的高度($P<0.01$),最高可分别增加19.9%和31.2%。在风速降低40%条件下,植被平均高度增加最显著,其中,优势物种猪毛菜在不同实验处理水平下对该地区植被平均高度增加的贡献最大,大果虫实次之,雾冰藜作用最小。在风速降低40%条件下,降水增加均使优势植物幼苗高度与自然降水相比显著降低,而风速降低40%、自然降水处理的优势植物幼苗高度较其他任一实验水平高;该结果表明:在分析沙地植被幼苗高度的主要生态影响因子时,风速是第一位的,风速降低40%对沙地植被幼苗生长高度的最大影响限度值得进一步研究。

4 结 论

(1) 降水和风速的改变会影响沙地植物种子萌发,降水处理对种子萌发物种数的影响较风速处理大,但作用不显著($P>0.05$)。

(2) 降水增加可显著促进沙地植物幼苗盖度增加,使植物幼苗密度大幅度降低。风速降低能使植物幼苗高度、盖度大幅度增加,对植物幼苗密度的抑制作用明显;风速降低可以显著促进优势物种猪毛菜幼苗高度的增加,并且使大果虫实幼苗的生长高度显著增大($P<0.01$),该结果说明沙地植物幼苗对风致机械刺激响应较大。

(3) 风速和降水变化对沙地植被物种多样性均无显著影响,这表明科尔沁沙地生态系统草本植物群落结构较为稳定,对降水及风速的变化并不敏感。

参考文献(References):

〔1〕 Duan D Y, Ouyang H, Song M H, et al. Water sources of dominant species in three alpine ecosystems on the Tibetan Plateau, China〔J〕. Journal of Integrative Plant Biology, 2008, 50(3):257－264.

〔2〕 郑艺,张丽,周宇,等. 1982—2012年全球干旱区植被变化及驱动因子分析〔J〕. 干旱区研究, 2017, 34(1): 59－66. 〔Zheng Yi, Zhang Li, Zhou Yu, et al. Vegetation change and its driving factors in global drylands during the period of 1982－2012〔J〕. Arid Zone Research, 2017, 34(1):59－66.〕

〔3〕 Ehleringer J R, Mooney H A. Leaf hairs: Effects on physiological activity and adaptive value to a desert shrub〔J〕. Oecologia, 1978, 37(2):183－200.

〔4〕 Daş Ci M, Koç A, ÇOmakli B, et al. Importance of annual and seasonal precipitation variations for the sustainable use of rangelands in semi arid regions with high altitude〔J〕. African Journal of Agricultural Research, 2010, 5(16):2 184－2 191.

〔5〕 Liu J S, Xu X, Zhang Y, et al. Effect of rainfall interannual variability on the biomass and soil water distribution in a semiarid shrub community〔J〕. Science China Life Sciences, 2010, 53(6):729.

〔6〕 Cheng X, An S, Li B, et al. Summer rain pulse size and rainwater uptake by three dominant desert plants in a desertified grassland ecosystem in Northwestern China〔J〕. Plant Ecology, 2006, 184(1):1－12.

〔7〕 Gardiner B, Berry P, Moulia B. Review: Wind impacts on plant growth, mechanics and damage〔J〕. Plant Science, 2016, 245:94－118.

〔8〕 张琳琳,赵晓英,原慧,等. 风对植物的作用及植物适应对策研究进展〔J〕. 地球科学进展, 2013, 28(12): 1 349－1 353. 〔Zhang Linlin, Zhao Xiaoying, Yuan Hui, et al. Advances in the effects of wind on plants〔J〕. Advances in Earth Science, 2013, 28(12):1 349－1 353.〕

〔9〕 Anten N P, Alcaláherrera R, Schieving F, et al. Wind and mechanical stimuli differentially affect leaf traits in *Plantago major*〔J〕. New Phytologist, 2010, 188(2):554－564.

〔10〕 于云江,史培军,鲁春霞,等. 不同风沙条件对几种植物生态生理特征的影响〔J〕. 植物生态学报, 2003, 27(1):53－58. 〔Yu Yunjiang, Shi Peijun, Lu Chunxia, et al. Response of the eco-physiological characteristic of someplants under blown sand〔J〕. Acta Phytoecologica Sinica, 2003, 27(1):53－58.〕

〔11〕 Pryor S C, Ledolter J. Addendum to "Wind speed trends over the contiguous United States"〔J〕. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010, 115(D10):D10103.

〔12〕 Yang H, Wu M, Liu W, et al. Community structure and composition in response to climate change in a temperate steppe〔J〕. Global Change Biology, 2015, 17(1):452－465.

〔13〕 Xu G Q, Li Y. Rooting depth and leaf hydraulic conductance in the xeric tree *Haloxylon ammodendron* growing at sites of contrasting soil texture〔J〕. Functional Plant Biology, 2008, 35(12):1 234－1 242.

〔14〕 赵哈林,李瑾,周瑞莲,等. 风沙流持续吹袭对樟子松幼树光合蒸腾作用的影响〔J〕. 生态学报, 2015, 35(20):6 678－6 685. 〔Zhao Halin, Li Jin, Zhou Ruilian, et al. Effects of sustained wind-sand flow on photosynthesis and transpiration rates of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* saplings〔J〕. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20):6 678－6 685.〕

〔15〕 朱选伟,黄振英,张淑敏,等. 浑善达克沙地冰草种子萌发、出苗和幼苗生长对土壤水分的反应〔J〕. 生态学报,2005,25(2):364－370.〔Zhu Xuanwei,Huang Zhenying,Zhang Shumin,et al. The responses of seed germination,seedling emergence and seedling growth in *Agropyron cristatum* to sand water content in Otindag Sandland,China〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2005,25(2):364－370.〕

〔16〕 孙岩,何明珠,王立,等. 降水控制对荒漠植物群落物种多样性和生物量的影响〔J〕. 生态学报,2018,38(7):2 425－2 433.〔Sun Yan,He Mingzhu,Wang Li,et al. Effects of precipitation control on plant diversity and biomass in a desert region〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2018,38(7):2 425－2 433.〕

〔17〕 张腊梅,刘新平,赵学勇,等. 科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应〔J〕. 生态学报,2014,34(10):2 737－2 745.〔Zhang Lamei,Liu Xinping,Zhao Xueyong,et al. Response of sandy vegetation characteristics to precipitation change in Horqin Sandy Land〔J〕. Acta Ecologica Sinica 2014,34(10):2 737－2 745.〕

〔18〕 吕晓敏,王玉辉,周广胜,等. 温度与降水协同作用对短花针茅生物量及其分配的影响〔J〕. 生态学报,2015,35(3):752－760.〔Lü Xiaomin,Wang Yuhui,Zhou Guangsheng,et al. Interactive effects of changing precipitation and elevated temperatures on plant biomass and its allocation of *Stipa breviflora*〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2015,35(3):752－760.〕

〔19〕 种培芳,詹瑾,贾向阳,等. 模拟 CO_2 浓度升高及降雨变化对荒漠灌木红砂光合及生长的影响〔J〕. 林业科学,2018,54(9):27－37.〔Zhong Peifang,Zhan Jin,Jia Xiangyang,et al. Influences of elevated CO_2 and precipitation regimes on photosynthesis and growth of desert shrub *Reaumuria soongarica*〔J〕. Scientia Silvae Sinicae,2018,54(9):27－37.〕

〔20〕 刘冰,靳鹤龄,孙忠,等. 近6 ka以来科尔沁沙地东部气候变化记录〔J〕. 中国沙漠,2011,31(6):1 398－1 405.〔Liu Bing,Jin Heling,Sun Zhong,et al. Climate change in East Horqin Sandy Land since 6.0 ka BP〔J〕. Journal of Desert Research,2011,31(6):1 398－1 405.〕

〔21〕 连杰,赵学勇,左小安,等. 科尔沁沙地水域景观格局的时空动态——以奈曼旗为例〔J〕. 中国沙漠,2012,32(1):210－218.〔Lian Jie,Zhao Xueyong,Zuo Xiaoan,et al. Dynamics of landscape pattern of water areas in Horqin Sandy Land,China: A case study in Naiman Banner of Inner Mongolia〔J〕. Journal of Desert Research,2012,32(1):210－218.〕

〔22〕 Guo H,Xu M,Hu Q. Changes in near-surface wind speed in China:1969－2005〔J〕. International Journal of Climatology,2015,31(3):349－358.

〔23〕 武利阳,左洪超,冯锦明,等. 中国土地利用和植被覆盖度变化对区域气候影响的数值模拟〔J〕. 兰州大学学报(自然科学版),2018,54(3):334－344.〔Wu Liyang,Zuo Hongchao,Feng Jinming,et al. Numerical simulation of the impact of land and green vegetation fraction changes on regional climates in China〔J〕. Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition),2018,54(3):334－344.〕

〔24〕 Yao S X,Zhao C C,Zhang T H,et al. Response of the soil water content of mobile dunes to precipitation patterns in Inner Mongolia,Northern China〔J〕. Journal of Arid Environments,2013,97(12):92－98.

〔25〕 刘新平,何玉惠,魏水莲,等. 科尔沁沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)生长对降水和温度的响应〔J〕. 中国沙漠,2016,36(1):57－63.〔Liu Xinping,He Yuhui,Wei Shuilian,et al. Growth response of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to precipitation and air temperature in the Horqin Sandy Land〔J〕. Journal of Desert Research,2016,36(1):57－63.〕

〔26〕 蒋德明,刘志民,寇振武,等. 科尔沁沙地生态环境及其可持续管理——科尔沁沙地生态考察报告〔J〕. 生态学杂志,2004,23(5):179－185.〔Jiang Deming,Liu Zhimin,Kou Zhenwu,et al. Ecological environment and its sustainable management of Horqin steppe:A report on the survey of Horqin sandy land〔J〕. Chinese Journal of Ecology,2004,23(5):179－185.〕

〔27〕 周欣,左小安,赵学勇,等. 科尔沁沙地植物群落分布与土壤特性关系的DCA、CCA及DCCA分析〔J〕. 生态学杂志,2015,34(4):947－954.〔Zhou Xin,Zuo Xiao'an,Zhao Xueyong,et al. Comparison analyses of DCA,CCA and DCCA on relationships between plant community distribution and soil properties of Horqin Sandy Land〔J〕. Chinese Journal of Ecology,2015,34(4):947－954.〕

〔28〕 吕朋,左小安,张婧,等. 放牧强度对科尔沁沙地沙质草地植被的影响〔J〕. 中国沙漠,2016,36(1):34－39.〔Lü Peng,Zuo Xiao'an,Zhang Jing,et al. Effects of grazing intensity on vegetation in sandy grassland of Horqin〔J〕. Journal of Desert Research,2016,36(1):34－39.〕

〔29〕 Zhang J,Maun M A. Effects of sand burial on seed germination,seedling emergence,survival,and growth of *Agropyron psammophilum*〔J〕. Canadian Journal of Botany,1990,68(2):304－310.

〔30〕 Zhang C,Yu F,Dong M. Effects of sand burial on the survival,growth,and biomass allocation in semi-shrub *Hedysarum laeve* seedlings〔J〕. Acta Botany Sinica,2002,44(3):337－343.

〔31〕 Gutterman Y. Seed germination in desert plants〔J〕. Endeavour,2014,19(1):47－47.

〔32〕 Dodd M B,Lauenroth W K,Welker J M. Differential water resource use by herbaceous and woody plant life-forms in a shortgrass steppe community〔J〕. Oecologia,1998,117(4):504－512.

〔33〕 孙羽,张涛,田长彦,等. 增加降水对荒漠短命植物当年牧草生长及群落结构的影响〔J〕. 生态学报,2009,29(4):1 859－1 868.〔Sun Yu,Zhang Tao,Tian Changyan,et al. Response of grass growth and productivity to enhanced water input in ephemeral desert grass land in Gurbantunggut Desert〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2009,29(4):1 859－1 868.〕

〔34〕 Leck M A,Brock M A. Ecological and evolutionary trends in wetlands:Evidence from seeds and seed banks in New South Wales,Australia and New Jersey,USA〔J〕. Plant Species Biology,2010,15(2):97－112.

〔35〕 赵丽娅,李锋瑞,王先之,等.草地沙化过程地上植被与土壤种子库变化特征〔J〕.生态学报,2003,23(9):1 745 – 1 756.〔Zhao Liya,Li Fengrui,Wang Xianzhi,et al. Characteristics of soil seed bank and standing vegetation change in sandy grasslands along a desertification gradient〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2003,23(9):1 745 – 1 756.〕

〔36〕 李淑君,李国旗,王磊,等.不同水分梯度对激发土壤种子库的效应研究〔J〕.北方园艺,2014(18):181 – 185.〔Li Shujun,Li Guoqi,Wang Lei,et al. A coupling relationship research on soil seed bank of different age artificial forest (*Caragana microphylla*) in desert steppe〔J〕. Northern Horticulture,2014(18):181 – 185.〕

〔37〕 王增如,徐海量,尹林克,等.塔里木河下游荒漠化过程土壤种子库特征〔J〕.中国沙漠,2009,29(5):885 – 890.〔Wang Zengru,Xu Hailiang,Yin Linke,et al. Characteristics of soil seed bank along desertification gradient in lower reaches of Tarim River〔J〕. Journal of Desert Research,2009,29(5):885 – 890.〕

〔38〕 王林,代永欣,樊兴路,等.风对黄花蒿水力学性状和生长的影响〔J〕.生态学报,2015,35(13):4 454 – 4 461.〔Wang Lin,Dai Yongxin,Fan Xinglu,et al. Effects of wind on hydraulic properties and growth of *Artemisia annua* Linn.〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2015,35(13):4 454 – 4 461.〕

Response of Plant Seedling Growth to the Changes in Precipitation and Wind Velocity in Horqin Sandy Land

SUN Shan-shan[1,2], LIU Xin-ping[1,3], WEI Shui-lian[4], ZHANG Tong-hui[1,3], HE Yu-hui[1,3], Chelmeg[1,2], LYU Peng[1,2,3], WANG Ming-ming[1,2]

(1. *Naiman Desertification Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *Gansu, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*; 3. *Urat Desert Steppe Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *Gansu, China*; 4. *Beijing ZTRC Environmental Protection Science &Technology Co., Ltd, Beijing* 100000, *China*)

Abstract: To study the response of plant seedling growth to the change of precipitation and wind velocity in sandy land, we carried out simulation control experiments by artificial precipitation and wind screen reduction in 40 concrete square pools of 2 m × 2 m × 2 m during the period of seed germination starting in mid-April 2016. The results showed that: ① Wind velocity, precipitation and interaction of these two treatments had no significant effect on the species richness ($P > 0.05$). The seed germination rates could be increased by 4.9% and 1.3% under the 20% wind velocity reduction and 60% precipitation increment, respectively, compared with those of controlled experiment. The species richness was increased by 7.2% under 20% reduction of wind velocity and 60% precipitation increment. ②The seedling density and height fluctuated greatly under different precipitation treatments. A wind speed reduction can significantly promote seedling growth height in sandy land, especially for *Salsola collina* and *Corispermum macrocarpum* ($P < 0.01$). Under the condition of natural wind speed, 30% precipitation increment obviously promoted the growth of seedling height, while 60% precipitation increment was contrary. Under the 20% wind velocity reduction, the growth height of *Bassia dasyphylla* seedlings could be greatly promoted by the 60% precipitation increment. The synergistic effects of the 40% wind velocity reduction and 30% and 60% precipitation increments resulted in a significant decrease in the growth height of the seedlings of *Bassia dasyphylla*, *Salsola collina* and *Corispermum macrocarpum*. ③ The effects of different wind velocity and precipitation treatments on species diversity, including the Simpson index (D), Shannon-Winner index (H) and Pielou evenness index (J), were not significant ($P > 0.05$). In conclusion, the effect of 30% precipitation increment on the species richness during the period of seed germination was significant, wind velocity was the main factor affecting the height of plant seedlings. Under the natural conditions, the increase of seedling height was the maximum under 40% wind velocity reduction. The response of species diversity to the change of wind velocity and precipitation was not sensitive, which indicated that the community structure of the ecosystem was comparatively stable in the Horqin Sandy Land.

Key words: psammophyte; precipitation; wind velocity; seedling growth; Horqin Sandy Land